

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11) 特許出願公告番号

特公平8-31636

(24) (44) 公告日 平成8年(1996)3月27日

(51) Int.Cl. <sup>a</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 1 L 41/12				
G 0 1 L 3/10	A			
H 0 1 L 41/20				

発明の数 1 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願昭62-307337	(71) 出願人	999999999 マグ ディヴ インコーポレーテッド アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 01201 ビッツフィールド ダウニング スリー 17 ビルディング 2シー
(22) 出願日	昭和62年(1987)12月4日	(72) 発明者	アイヴァン ジェー. ガーシェリス アメリカ合衆国マサチューセッツ州 01201 ビッツフィールド サウス マウ ンテン ロード 176
(65) 公開番号	特開昭63-252487	(74) 代理人	弁理士 森本 義弘 (外1名)
(43) 公開日	昭和63年(1988)10月19日		
(31) 優先権主張番号	9 3 8, 4 0 4	審判の合議体	
(32) 優先日	1986年12月5日	審判長 遠藤 政明	
(33) 優先権主張国	米国 (U S)	審判官 関根 恒也	
(31) 優先権主張番号	1 1 9, 5 3 1	審判官 真々田 忠博	
(32) 優先日	1987年11月17日		
(33) 優先権主張国	米国 (U S)		
審判番号	平5-4893	(56) 参考文献	特開 昭59-228140 (J P, A)

(54) 【発明の名称】 磁気弾性トルク・トランスデューサ

1

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】トルクが加えられる回転軸の周面に形成されて、その加えられたトルクにตอบสนองして透磁率を変化させる強磁性・磁歪手段と、この強磁性・磁歪手段の周辺に配置されてこの強磁性・磁歪手段に磁場を付与する励磁手段と、前記の加えられたトルクに起因する強磁性・磁歪手段の透磁率の変化を感知する検知手段と、前記の感知された透磁率の変化を、前記回転軸に加えられたトルクの大きさを示す電気信号に変換する処理手段とを備えた磁気弾性トルク・トランスデューサであって、前記強磁性・磁歪手段が、鉄-ニッケル・マルテンサイト型の鋼合金と熱的に硬化された鋼合金とから選ばれた鋼合金にて構成されており、前記熱的に硬化された鋼合金は、絶対値が5ppm以上である実質上正方性の磁歪性を示すとともに、0.05ないし0.75重量%の炭素と、当該合金

2

の磁歪値を絶対値で前記の5ppm以上に高めるのに充分な量の、ニッケル、クロム、コバルト、チタン、アルミニウム、マンガン、モリブデン、銅、ホウ素から選ばれた元素とを含み、前記強磁性・磁歪手段は前記回転軸の軸方向へ一定幅を有するように形成され、この強磁性・磁歪手段は、前記回転軸の表面においてローレット加工に伴う塑性変形により生じた螺旋方向のマクロスコピックな形態変化を有して、この形態変化を伴う塑性変形にもとづく残留応力による螺旋方向の磁気異方性を有していることを特徴とする磁気弾性トルク・トランスデューサ。

【請求項2】強磁性・磁歪手段は、回転軸の円周長さの少なくとも50%に残留応力域を有していることを特徴とする特許請求の範囲第1項に記載の磁気弾性トルク・トランスデューサ。

【請求項3】強磁性・磁歪手段は、回転軸の全周に残留応力域を有していることを特徴とする特許請求の範囲第2項に記載の磁気弾性トルク・トランスデューサ。

【請求項4】磁気異方性の強さは、強磁性・磁歪手段内のランダムな磁気異方性よりも十分に強く、このランダムな磁気異方性の合計による影響を無視できるように構成されていることを特徴とする特許請求の範囲第1項から第3項までのいずれか1項に記載の磁気弾性トルク・トランスデューサ。

【請求項5】強磁性・磁歪手段は、ニッケルマレージング鋼にて形成されていることを特徴とする特許請求の範囲第1項から第4項までのいずれか1項に記載の磁気弾性トルク・トランスデューサ。

#### 【発明の詳細な説明】

##### (産業上の利用分野)

本発明はトルク・センサに関し、特に、回転シャフトにかかったトルクの測定値を与える非接触型磁気弾性トルク・トランスデューサに関する。

##### (従来技術とその問題点)

回転駆動シャフトを有するシステムの制御においては、トルクは重要な基本的パラメータであることが一般に認められている。従って、正確で、信頼性があり、しかも安価な方法でトルクを感知し測定することは、数十年の間、労働者の主な目標であった。長足の進歩はあったけれども、厳しい環境においても長期間にわたって連続的にトルクを測定することのできる安価なトルク感知装置を求める強い要求が今だにある。

全ての磁気弾性トルク・トランスデューサは2つの要素を共有している。すなわち、

(1) 強磁性で磁歪効果を示す、トルクをかけられる部材を有すること、前者は磁区が存在を保証し、後者は、かけられたトルクに伴う応力によって各磁区の磁化方向が変えられ得ることを意味する。

(2) トルクがかかっていない時の磁区方向分布からの変化を感知する(大概是電磁的であるが、必ずしもそうではない)手段を有すること。現存する、あるいは提案されている様々な磁気弾性トルク・トランスデューサの相異は、これら共通の要素の違いにある。

磁性材料の透磁率が、加えられた応力によって変化することは周知されている。磁歪材料の柱状シャフトに振り応力が加えられると、シャフトの各要素に剪断応力が作用する。この剪断応力は、引張り応力と、同等で垂直な圧縮応力とで表わすことができるものであり、各応力の大きさは、シャフト軸とその要素との間の距離に正比例する。最大の引張り及び圧縮の方向は、シャフトの軸の周囲の45°左回り螺旋及び45°右回り螺旋に対する接線に沿って存在する。トルクの効果は、その螺旋の1つに平行な方向における透磁率を増大させると共に、これに対応して、他方の螺旋に平行な方向における透磁率を減少させることである。1954年6月の『科学機器評

論』第25巻第6号の『回転シャフトにおけるトルクの磁気測定』と題した論文(“Magnetic Measurements of Torque in a Rotating Shaft”, The Review of Scientific Instruments, Vol. 25, No. 6, June, 1954)において、Beth氏とMeeks氏は、加えられたトルクの尺度として透磁率の変化を使うためには、主応力方向に沿う透磁率を監視すると共にシャフトの表面付近の部分に磁束を通すべきことを提案している。その理由は、要素がシャフト軸から遠いほど応力が大きくなり、そして最大透磁率変化が生じると期待されるのは主応力方向に沿ってであるからである。

これを実現するために、Beth氏とMeeks氏とは、シャフト内に交番磁束を発生させる駆動コイルと、シャフト内の主応力方向又はその近くに延在する磁束通路における、加えられたトルクによる透磁率変化を検出するために数本の枝の各々に配置されたピックアップ・コイルとを担持したヨークを使用した。シャフトにトルクが加えられると、トルクに起因する機械的応力は、相互に垂直な圧縮応力と引張り応力とに分解し、それらは、シャフト内の透磁率を、一方の応力の方向に増大させ他方の応力の方向に減少させる。その結果、ピックアップ・コイルすなわち測定コイルに誘起される電圧が増大又は減少する。誘起された電圧の大きさの差は、シャフトに加えられた振り応力に比例する。

Dahle氏の米国特許第3,011,340号に類似のアプローチが記載されている。これらの種類の装置の主な短所は、主応力方向沿いに透磁率感知を行なう必要があることであり、これに伴って、それがシャフトからの半径方向距離の変化に敏感であること、シャフトの周囲が磁的に不均一であること、シャフト速度への依存性が補償不可能であること等の欠点がある。その結果、例えばこれらの装置等は、6インチ以上の大直径シャフトに適用されているだけであり、大多数の用途が集中している小直径シャフトには応用不能であった。

Beth氏及びMeeks氏の論文や米国特許第3,011,340号に記載されている装置等においては、回転するシャフト自体がトランスデューサの磁性要素として作用するが、その種の装置は実用上著しい欠点を持っていた。その理由は、希望の使用分野において望ましい機械的性質をシャフトに与えるために使用された材料と冶金処理が、殆どの場合に、磁気弾性トルク・センサに要求される磁気的性質を得るために最適ではなく、あるいは望ましくさえないからである。製造の過程において内部応力により、及び/又は結晶方向の異なる領域からシャフト内に生じた無秩序な異方性は、シャフトの透磁率に局所的変化を生じさせる原因となり、それは、感知された電圧と加えられたトルクとの間の望ましい相関を歪める。

Scoppe氏の米国特許第3,340,729号の解決策は、溶接等により磁性スリーブを荷重担持シャフトに固着して、振り荷重に比例する振り歪がスリーブに生じるようにす

る方法である。ここで使用された測定装置は、回転するシャフトではなくて回転するスリーブにおける透磁率の変化を感知する。そのため、Scoppelによれば、シャフトに対して要求される機械的及び強度的性質を最高にする材料をシャフト用に選択し、且つ、スリーブの磁氣的性質に最高にする別の材料をスリーブ用に選ぶことができる。従来技術の装置と同様に、Scoppel氏のトルク・メータは、磁束を発生させる一次巻線と、1つは引張り方向に他の1つは圧縮方向に向けられた2つの二次巻線とを使用する。Dahle氏により提出された材料問題の少くとも一部分は除去したが、スリーブを固着して使用することは、他の、同様に困った問題を発生させた。例えば、スリーブを製造して取付ける仕事は手に負えない厄介な仕事であり、たとえ取付け手段が溶接である時にも、強度上の問題はないが、非常に重大な問題が残っている。すなわち、鋼製シャフトの熱膨張係数は、スリーブ用に選ばれた如何なる磁性材料の熱膨張係数とも異なる（場合によっては50%も大きい）。溶接等の高温固着処理を行った後に冷却をすると磁性材料内に応力が生じ、これにより磁氣的異方性を無秩序に変化させる結果となる。更に、その応力を除去するためにシャフトとスリーブを焼き戻すと、シャフトの望ましい機械的性質も消失し、且つスリーブの磁氣的性質が変化する。また、Dahle氏の装置と同様に、主応力方向沿いの透磁率変化を監視する必要があることに起因するScoppel氏のトランスデューサの短所は、シャフトからの同トランスデューサの半径方向距離の変化に敏感であること、シャフト周辺の磁氣的性質が不均一であること、及びシャフト速度に依存することである。

磁気弾性トルク感知への別のアプローチは、トルクが加えられるシャフトに接着された2組の非晶質磁気弾性素子の差動磁気応答を利用する。このアプローチは、従来のアプローチと比べると、回転位置及びシャフト速度に敏感であるという利点を持っている。しかし、その素子の調整と取付けには過度の注意が必要である。その上に、トランスデューサとしての性能は、トルクが加えられる部材の形状にそのリボン状素子を適合させるために用いる方法；例えば、硬化中の縮み、膨張係数、時間の経過に伴うクリープ、持続する荷重下の温度等の、接着剤の性質；例えば軟度、安定性等の、非晶質材料自体の機能的性質から不利な影響を受ける。もう1つの関心事は、トランスデューサが働く環境と接着剤との適合性であって、例えば、オイル、水又は他の溶剤又は潤滑剤の接着剤に対する影響などが問題である。

『応力感応非晶質リボンを用いる新型トルク・トランスデューサ』と題したHarada氏外の論文（the article "A New Torque Transducer Using Stress Sensitive Amorphous Ribbons", IEEE Trans. on Mag., MAG-18, No. 6, 1767-9, 1982）は、2本の応力感応非晶質リボンをシャフトの、軸方向に離れた部位の周囲に接着して形成する

トルク・トランスデューサを開示している。シャフトに第1方向のトルクを加え、これに第1リボンを接着し、このトルクを解除して第1リボン内に弾性トルク応力を発生させ、シャフトに反対方向のトルクを加え、これに第2リボンを接着し、そのトルクを解除して第2リボン内に弾性トルク応力を発生させることによって、各リボンに1方向磁気弾性磁気異方性を生じさせる。その結果、一方のリボンの異方性は、シャフト軸に対して $+45^\circ$ の右回り螺旋に沿って生じ、他方のリボンの異方性は、シャフト軸に対して $-45^\circ$ の軸対称左回り螺旋に沿って生じる。交流で励磁されるコイルと感知コイルとがシャフトを囲んで、トランスデューサを円対称的にすると共に、シャフトの回転による出力信号のゆらぎを根本的に除去している。トルクが存在しない時には、2本のリボンの磁化は同等の軸方向磁化力に対称的に応答し、感知コイルはリボンの応答に何らの差も検出しない。しかし、トルクが加えられると、そのトルクにより主軸沿いに発生した応力異方性は、予めリボンに生成されていた静止異方性と非対称的に結合するので、同等の軸方向磁化力に対する2本のリボンの応答に差が生じる。この差応答はトルクの関数であり、感知コイルと、付属の回路は、加えられたトルクに比例する出力信号を出す。

特公昭58-9034号においては、略々同様のアプローチを用いており、2本の非晶質リボンをシャフトに接着し、所定の、等しい反対向きの角度の磁場で熱処理をして対称的磁気異方性をリボンに与える。非晶質リボンを $\pm 45^\circ$ の山形パターンでシャフトに接着したり（これについては、Sasada氏外の論文『IEEE Trans. on Mag., MAG-20, No. 5, 951-53, 1984』を参照されたい）、 $\pm 45^\circ$ 方向に並んだ平行スリットを有する非晶質リボンをシャフトに接着したりして（これについては、Mohri氏の論文『IEEE Trans. on Mag., MAG-20, No. 5, 942-47, 1984』を参照）、残留応力による磁気異方性ではなくて形状磁気異方性をリボンに生じさせる。磁気弾性トルク・トランスデューサにおいて非晶質リボンを接着して使用することに関する他の新しい成果が、Iwasaki氏の米国特許第4,414,855号と、Vranish氏外の米国特許第4,598,595号に開示されている。

もっと近頃になって、リボンを接着して用いることに固有の重大な短所を認識して、適当なマスク材の上に金属をプラズマ吹付け及び電着する方法が利用されるようになった。下記の論文を参照されたい。Yamasaki et al., "Torque Sensors Using Wire Explosion Magnetostriuctive Alloy Layers", IEEE Trans. on Mag., MAG-22, No. 5, 403-405 (1986); Sasada et al., "Noncontact Torque Sensors Using Magnetic Heads and Magnetostriuctive Layer on the Shaft Surface-Application of Plasma Jet Spraying Process", IEEE Trans. on Mag., MAG-22, No. 5, 406-408 (1986)。

非晶質リボンを用いる上記の仕事は、対称的な、螺旋

形に配向した磁気異方性を有し、軸方向に離れた円周バンドがトルク・トランスデューサの改良に寄与するという最初の評価ではなかった。

ソ連発明者証第274,420号はHarada氏外の非晶質リボン・トランスデューサと似ていなくもない磁気弾性トルク測定装置を開示しており、この装置は1対のスリーブから成り、初めに、これに異なる方向のトルクを加えて変形させて、反対向きの磁気異方性をスリーブに与え、次にこれをシャフトに形成した環状溝に取付ける。その溝の半径方向深さは、スリーブをその中に收容して、スリーブの外径がシャフトの外面と共平面になるような深さである。適当な電子回路を用いて、シャフトにトルクが加えられた時、スリーブの透磁率変化を検出し、これに対応する電気信号を発生させる。スリーブ又はシャフトに用いる材料については何らかの指示もない。変形したスリーブをシャフトに取付ける方法に関しても何も開示されていない。その技術、接着剤又は溶接がどのような技術であっても、得られたトルク測定装置はScoppe氏の溶着スリーブ（米国特許第3,340,729号）やHarada氏の接着リボンと同じ欠点を持つことになる。

ソ連発明者証第667,836号は磁気弾性トルク・トランスデューサを開示しており、このトランスデューサは、シャフト上で軸方向に離れた2本の周囲バンドを有し、同バンドは、 $\pm 45^\circ$  山形パターンを成してシャフトに形成された複数のスロットによって画定されており、1対の励磁及び測定コイル取付け周囲ボビンがシャフトに沿って軸方向に配置されている。そのスロットによって生成された形状異方性は、Sasada氏外の山形パターン非晶質リボン及びMohri氏のスリット付き非晶質リボンと同じ種類のシャフトの磁気予備調整であり、同じ短所を多く持っている。

日本特許第169,326号は、強磁性材料から成る回転シャフトのトルクを測定する手段を開示している。その手段は、シャフト面上で軸方向に離れた1対のバンドを含み、同バンドには、 $\pm 45^\circ$  の対向する角度で刻みが形成されており、更に、それぞれのバンドを囲み、トルクがシャフトに加えられた時に磁束の変化を感知して、その加えられたトルクに比例する起電力を発生させるコイルを含む。刻みを付けるのに使うプロセス、シャフトのバンド部分に用いられる強磁性材料、シャフトをなまして応力を除去し又は機械的強度を与える熱処理に関しては、この特許は何も教示していない。更に、この特許は、トラフ間の距離が大きいことを図面で示唆しているが、刻みの形態やトラフ密度について詳しくは開示していない。確かに、バンドが、その周囲の長さの少くとも50%にわたって残留応力の無い区域（無残留ストレス域のない周囲領域を少くとも1つ含むという教示はない。また、1つのバンドの刻み『丘』には圧縮応力がかかり、他方のバンドの刻み『丘』には引張り応力がかかるという記載は、刻みに通じる機械的作業によって生成さ

れた残留応力ではなくて、シャフト面の巨視的形狀変更すなわち刻みから磁気異方性が生じることを示唆するものである。

従って、この特許は、残留応力から生じた磁気異方性ではなくて、形状変更から生じた磁気異方性が、感知された透磁率変化の原因であると教示していると思われる。この教示は、切削又はフォトリソグラフィ（これは、残留応力に起因する異方性をバンドに生じさせない）等の技術で比較的広く離間したトラフを有する刻みを形成することと全く矛盾しない。専ら、又は実質的に、形状変更に依存するトルク測定装置のバンドに予め生成される異方性は、実用に供するには余りに僅かである。

ソ連発明者証第838,448号は、シャフト上に離間して設けられた2つの円周方向バンドと、このバンドを囲んでその上に設けられた円周方向励磁コイルと円周方向測定コイルとを有する磁気弾性トルク・トランスデューサを開示している。このトランスデューサにおいては、シャフト面に刻みを設けることによってバンドを形成しており、刻みのトラフはシャフト軸に対して $\pm 45^\circ$  の角度を成している。一方のバンドのトラフは他方のバンドのトラフに対して垂直である。刻みは、開示されていない方法によって注意深く形成されており、これは、隣り合うトラフ間に応力のかかっていない面が広く存在することを保証するものである。トラフの透磁率は、その間の無ストレス域の透磁率とは異なる。トラフの幅対ピッチ比が応力面積無応力面積比と一致し、所望の比は0.3であると思われるので、どちらのバンドにも、その周囲の長さの30%以上にわたって故意に応力を加えられる周方向領域は存在しない。この極小応力異方性事前調整は、経済的な商業上の使用を目的としては、測定コイル及びその付属回路の電子信号出力で測定される。一貫したトランスデューサ感度を与えるには余りにも小さいと思われる。

トルクが加えられるシャフト上の敏感で実用的な磁気異方性のバンドの形成に多くの短所があるけれども、Harada氏外、Sasada氏外、Mori氏及びYamasaki氏外の論文及び前記ソ連発明者証に明示された成果は、対称的な螺旋方向異方性を有する1対の軸方向に離れた円周方向バンドが周面全体にわたって軸方向の透磁率の差を平均化することを可能にするものであると認められるので、Beth氏及びMeeks氏、Dahle氏及びScoppe氏の先の仕事からの著しい進歩を表わしている。これは、以前提案されていたように主応力軸に沿って感知される螺旋状透磁率差を平均化しようとする試みより著しく単純である。

更に、回転速度も、半径方向偏心率も、このようにして感知される透磁率に著しい影響を与えない。それにも拘らず、トルクに加えられる部材の表面に、磁気弾性を最大に活用できる材料を取付ける手段を完成させようとする斯かる努力は、その結果としてのトルク・センサに不都合な制限を招来するものである。接着剤で非晶質リ

ボンをシャフトに付着させる場合には、リボンをシャフトの形状に適合させる方法、接着剤の性質、及び非晶質材料の機能上の性質等の著しい欠点に煩わされることになる。Scoppe氏や、最近ではBlomkvist外の米国特許第4,506,554号に教示されている。堅く取付けたスリーブを用いることは、コストが高くなるし、高温溶接により応力が生成されるし、且つ／又は、その後の焼戻しにより磁氣的及び機械的性質に不確実な点が生じるので、実用には適していない。同様に、応力異方性を発生させるために形状異方性又は広い無応力領域を当てにすると、その技術を商業的実施には適さなくするような重大な問題が起きる。

従って、トルク・トランスデューサ技術には多くの前進があったとはいえ、従来のトルク・トランスデューサよりはるかに経済的で、経済的にも環境的にも従前は実行不可能であった多くの目的に使用することができると共に、大直径シャフトにも小直径シャフトにも、それが静止していても実用的速度で回転していても使用することができる磁気弾性トランスデューサが依然として求められていることは明らかである。

#### (発明の概要)

本発明は、トルクが加えられる回転軸の周面に形成されて、その加えられたトルクにตอบสนองして透磁率を変化させる強磁性・磁歪手段と、この強磁性・磁歪手段の周辺に配置されてこの強磁性・磁歪手段に磁場を付与する励磁手段と、前記の加えられたトルクに起因する強磁性・磁歪手段の透磁率の変化を感知する検知手段と、前記の感知された透磁率の変化を、前記回転軸に加えられたトルクの大きさを示す電気信号に変換する処理手段とを備えた磁気弾性トルク・トランスデューサであって、前記強磁性・磁歪手段が、鉄-ニッケル・マルテンサイト型の鋼合金と熱的に硬化された鋼合金とから選ばれた鋼合金にて構成されており、前記熱的に硬化された鋼合金は、絶対値が5ppm以上である実質上等方性の磁歪性を示すとともに、0.05ないし0.75重量%の炭素と、当該合金の磁歪値を絶対値で前記の5ppm以上に高めるのに充分な量の、ニッケル、クロム、コバルト、チタン、アルミニウム、マンガン、モリブデン、銅、ホウ素から選ばれた元素とを含み、前記強磁性・磁歪手段は前記回転軸の軸方向へ一定幅を有するように形成され、この強磁性・磁歪手段は、前記回転軸の表面においてローレット加工に伴う塑性変形により生じた螺旋方向のマクロスコピックな形態変化を有して、この形態変化を伴う塑性変形にもとづく残留応力による螺旋方向の磁気異方性を有していることを特徴とする磁気弾性トルク・トランスデューサを提供する。

このような構成において、一般に軸物に対する転造などの塑性加工では、その塑性加工された形状を安定に保つために塑性変形による残留応力を除去するのが通例であり、そのために熱処理などが行われるのに比べ、本発

明では磁気異方性に寄与する有用な残留応力を塑性変形により発生させることで、この塑性変形に伴う残留応力を除去せずに、これを逆に活用して、磁気弾性トルク・トランスデューサに適用することができる。すなわち、本発明によれば、ローレット加工に伴う塑性変形により生じた螺旋方向のマクロスコピックな形態変化を有して、この形態変化を伴う塑性変形にもとづく残留応力による螺旋方向の磁気異方性を有する構成とすることで、強磁性・磁歪手段にて構成される磁気異方性部に残留応力異方性と形状異方性とを兼備させることができ、これによってトルク・トランスデューサの感度とその信号の強度とを向上させることができる。

#### (実施例)

本発明は磁気弾性トルク・トランスデューサを提供するものであって、このトランスデューサは、(1)トルク支持部材を有し、少くともその表面の、適当な軸方向範囲の少くとも1つの完全周囲領域が略々強磁性で磁歪硬化を示し；(2)この領域内で軸方向に別れた2つの周囲バンド又はそのような2つの領域の各々にそのようなバンドが設けられており、それらには、それぞれ、対称的な、螺旋の方向の、塑性変形により発生した残留応力によって誘起された磁気異方性が与えられていて、トルクが加えられていない時には、一方のバンドにおいては磁化は左回り(LH)螺旋に沿う方向に向き、他方のバンドにおいては軸対称的な右回り(RH)螺旋に沿う方向を向いており；(3)トルクが加えられる部材に接触することなく、等しい軸方向磁化力に対する2つのバンドの応答の差を検出する磁気弁別装置が設けられている。

本発明の磁気弾性トルク・トランスデューサの上記特徴は、第1図を参照すれば、もっとよく理解されるであろう。

同図において、強磁性・磁歪材料で形成された、又は少くとも強磁性・磁歪領域4を有する円柱状のシャフト2は、軸方向に離れた1対の周囲バンドすなわち環状バンド6,8を有し、同バンドは、それぞれ、各々の磁化容易軸10,12の角方向±θの対称的螺旋方向の磁気応力異方性を与えられている。磁気弁別器14がシャフト2から僅かに半径方向に離れている。θの任意の値について $\cos \theta = \cos(-\theta)$ であるから、これら2本のバンドの中の磁化の縦方向すなわち軸方向の成分は同一であり、従って、磁気弁別器は差検出しない(すなわちゼロを検出する)。

シャフト2にトルクが加わると、それから生じた応力異方性は、意図的にバンド内に浸透させてあった静止異方性と非対称的に結合するので、等しい軸方向磁化力に対する2つのバンドの応答に差が生じる。応力異方性はトルクの方角と大きさの関数であるから2つのバンドの作動応答はトルクの単調関数となる。その結果として各バンドに生じる磁気異方性の差は、一方のバンドの軸方向透磁率が増大し、他方のバンドのそれが減少すること

で立証される。2つのバンドの軸方向透磁率の差を用いてトルクを感知する。適切に設計された磁気弁別器は、その作動応答の特徴を詳しく検出して出力信号（これはトルクのアナログである）を発生させる。

本発明により、トルク支持部材は、同部材の強磁性領域に、軸方向に離れた2つの周囲バンドすなわち環状バンドを備えている。これらのバンドについては、同一直径の部材上に配置されていて、且つ同じトルクが加わるように互いに十分に接近しているべきであることを除いて、幾何学的、空間的、場所的又は周囲に関する特別の制限は無い。バンドは、ローレット加工に伴う塑性変形により生じた螺旋方向のマクロスコピックな形態変化を有して、このバンドには、この形態変化を伴う塑性変形にもとづく残留応力による螺旋方向の磁気異方性が与えられている。

この残留応力により磁気異方性を付与することとは、塑性変形により残留応力を発生させることである。即ち、加えていた応力を解除した時に、外力が無い状態で部材が無応力状態に弾性的に復元することができなくなるように、少なくともその表面領域の弾性限界以上の応力を部材に加えることである。一般に、金属材料を塑性変形により加工すると、結晶構造に欠陥が生じ、材料の強さ等に悪影響を与えるため、塑性変形により生じた残留応力を残したままにすることは避けるべきものと考えられている。

しかし、本発明では、加工に一定の条件を課すことにより塑性変形により悪影響を避け、磁気異方性に寄与する有用な残留応力を発生させることができることに鑑み、この塑性変形を逆に活用して磁気弾性トルク・トランスデューサに適用したものである。残留応力が残って、周知の如くに、これが磁気異方性を発生させる。応力を加える方法に依存して、接線主残留応力の、部材の軸に対する方向角は、 $0^\circ$ より大きく $90^\circ$ より小さい範囲で変化する。残留応力の方向角と、その結果としての磁化容易軸の方向角とは、 $10^\circ$ ないし $80^\circ$ であることが好ましく、 $20^\circ$ ないし $60^\circ$ であることが最も望ましい。

本書においては、『残留応力』は、外力が無い時に物体内に存在する応力を意味する。その分布は、物体内の色々な部分に作用する力及びモーメントを合計すると、物体全体ではゼロとなるような分布である。従って、若し1つの領域が正味の力及び／又はトルクを物体の残りの部分に作用させれば、これと相殺する力及び／又はトルクを他の領域が作用させなければならない。自己相殺分布を確立するための、残留応力についてのこの要求の帰結として、引張り応力を受ける領域が存在しなければ、これと通じて圧縮応力を受ける領域が存在しなければならない。塑性変形により発生した残留応力は、しばしば、領域の寸法と、相殺し合う領域の間の距離とにより、短距離（SR）応力及び長距離（LR）応力に分類される。SR応力は、数原子の寸法から、単一の粒等のミクロ

構造に匹敵する寸法までの領域に存在する。LR応力は、1粒子以上の寸法から物体全体の巨視的寸法までにわたって存在する。巨視的な軸方向範囲の周囲バンドの大部分にわたって比較的に整然とした磁気異方性が存在しなければならないという本発明の要求は、慎重に浸透させた適切な分布のLR応力で満たすことができる。いずれのバンドにおいても、表面及びその近傍における残留応力の主成分は、バンド全体にわたって比較的に一樣であり、螺旋指向性で特徴づけることができる。この表面応力を相殺するのに必要な応力は、表面磁気感知によって検出不可能であるように表面から半径方向内方に向けて存在するのが望ましい。逆回りではあるが、同様の分布の等角螺旋を、協働するバンドに浸透させる。

トルクの感知は、主として、トルクが加えられる部材の表面における透磁率の変化を感知することによって達成されるのであるから、塑性変形により発生した残留応力により生成された磁気異方性が存在しなければならないのは、各バンドの少くとも表面である。従って、塑性変形により加えられる応力は、少くとも、部材の表面における弾性限界により十分に大きくなければならないという制限が存在する。勿論、その最小限度より大きい応力を加えれば、その加えられた応力の大きさに依存して、物体の内部にも応力が残留する結果となることが理解されるであろう。本書において部材の『表面』は、表面及びその内側0.010インチまでを意味するものとす

る。

部材の表面をローレット加工することにより、バンドの表面において部材の弾性限界を超える応力が加えられ、これにより部材の断面にわたって不均一な塑性変形が生じる。残留応力を誘起するために加える応力は、使用中にその部材に加わると予想される最大の応力より大きいことが特に望ましい。その目的は、使用中に加わるトルクによっては残留応力パターンと共にバンド内の磁気異方性が変化しないことを保証することである。等しい軸方向磁化力が部材に加えられている時、軸方向透磁率感知によって、トルクが加わっていないければ『差無し』出力が、等しい時計回り（CW）及び反時計回り（CCW）のトルクが加わった結果としては等しいが反対の出力が生産されるように、それぞれのバンドに誘起される残留応力は略々等しくて対称的であるべきである。

残留応力を生じさせるためにその弾性限度より大きい応力を部材に加える方法によれば、バンドの表面全体にわたって、すなわちバンドの全周にわたり且つその軸方向の全長にわたって、連続的に略々均等な残留応力を誘起するかも知れない。あるいは、その方法は、応力区域と無応力区域との両方を含む残留応力パターンを各バンドに誘起するかも知れない。しかし、そのようなパターンについては、その周囲長さの少くとも50%、望ましくはその周囲長さの少くとも80%にわたって、無応力区域（無ストレス域）の無い連続的周囲領域が少くとも1つ

は各バンドに存在しなければならないという重要な制限がある。特に好適な形態においては、各バンドは、その周囲長さ全体にわたって無応力区域を持たない少くとも1つの連続的周囲領域を有する。一般に、シャフトのなるべく広い部分に、比較的に強い統制された磁気異方性を与えるために、シャフト面の、意図的に応力を加える面を最大にすることが特に望ましい。これにより、シャフト製造中に内部応力により生成されたり結晶方向から生じたりする無秩序な異方性のみを受けるシャフト面が可能な限り小さくなる。トルク・センサの磁気回路の能動的素子、すなわち感知領域としてシャフト自体を使用することに固有の無秩序な異方性に伴う問題は、本発明により、その無秩序な異方性を、意図的に生成した残留応力によって誘起した比較的に強い異方性で置換又は圧倒することによって克服されるものである、ということが理解されるべきである。明らかな理由から、意図的に誘起した異方性が大きいほど、残留した無秩序な異方性は重要でなくなる。

以上及び以下の記載において、『周囲領域』は、先に定義した如く、(1)部材の軸に垂直な平面と(2)部材の表面との交線を画定する点の軌跡を意味する。部材が円柱状シャフトである場合には、周囲領域は円柱面とシャフト軸に垂直な平面との交線を画定する円であり、その円は円周又は周囲長さに有する。換言すると、周囲領域を構成する部材の表面の各要素を調べれば、その各要素には応力が加わっているか、又は加わっていることも、いないこともある。広い応用可能性を有し、特に小直径シャフトに適用でき、容認可能で実用上再現可能な感度、直線性及び出力信号強度を示す実用的なトルク・センサを形成するために、それらの要素の少くとも50%は、その弾性限界より大きい応力を加えられなければならない。従って、加えられていた応力が除去された後に応力がその中に残留していなければならない。残留応力により浸透させられた螺旋方向の磁化容易軸(すなわち、磁化が最も容易な方向)を含む所望のバンドをトルク支持部材に与えるに際し、トランスデューサの性能という観点から最も重要な考慮事項は、結果として得られる異方性が充分であること、すなわち、生成されたバンドの異方性が、少くとも、加えられたトルクの寄与する応力異方性に匹敵する強さを持っていなければならないことである。トランスデューサが据付けられる装置との両立性の観点から考慮しなければならないことは、部材の本来の機能に対する影響である。

他の重要な考慮事項は、実用性と経済である。本発明にもとづくローレット切りは、實際上如何なる直径のシャフトに残留応力を誘起するのに望ましい方法である。ローレット切りでは、バンドの位置、その軸方向範囲、離隔距離を精密に制御することができる。その上、ローレット切りでは、容易軸の振れ角を割合簡単に制御することができる。非常に重要なことに、ローレット

切りでは、ピッチ、深さ及び断面形状等の刻み自体の凸部の特徴を予め設定することができるので、誘起される残留応力を制御することができる。本発明においては、その周囲長さの少くとも50%にわたって無応力(ストレス)区域の無い連続的周囲領域が少くとも1つ各バンドに存在することとなるように、各バンドの表面の充分な部分に応力を加えなければならない。全てのローレットがこのように広いわけではなく、刻みと、この目的を達成するその刻みを適用する方法を選ぶには注意が必要である。ローレット切りはシャフトの表面を粉碎してその上に刻みを形成するので、刻み付きバンドには残留応力異方性と共に形状異方性が与えられる。例えば、目的とする用途と両立させるためにそれが望まなければ、刻みの粗い形状特徴をシャフトから削り取って、残留応力に起因する磁気異方性のみを残すことができる。各バンド内の周囲領域の周囲長さに沿うストレス域のパーセント(%ストレス域)と感度(単位:mV/N-m)との間の関係は、『%ストレス域』が増大すれば感度が増大するという関係である。これらのパラメータをプロットして得られるカーブは、『%ストレス域』の低い値で最大の勾配を有し、『%ストレス域』が、100%まで、大きくなるに従って勾配が減少してゆき、100%において感度は最大で、勾配はゼロに近い。カーブの正確な形状、『%ストレス域』の特定な値におけるカーブの勾配、その初期の上昇率、及び上昇率が減少してカーブが横ばいになる点、は全てバンドの材料と、応力を加える方法との関数である。代表的なカーブを第7図に示してある。

『A』においては、周囲領域の周囲長さに沿って残留応力は存在しない。『C』において、周囲領域の周囲長さの100%に残留応力が加わっている。『B』は、おおよそ感度が横ばいになり始める、すなわち『%ストレス域』に対して鈍感になるカーブ上の点を表わしており、この点は材料及び方法の両方に依存する点である。

理想的には、100%残留応力、すなわちカーブ上の『C』におけるトルク・センサ作動が最善である。それは、感度の変化率が最小であり、一般に、殆んどの方法において100%ストレス状態が最も得やすいからである。実際問題として、残留応力誘起方法を制御して100%より小さい所望の『%ストレス域』の値を達成するのは困難である。しかし、実際の生産の問題を別にすれば、バンドの周囲領域の長さに沿って100%より少し残留応力に対応する感度レベルで作動する容認可能なトルク・センサを作ることではある。

トルク・センサを第7図のカーブに沿って上昇部分ABで経済的に且つ再現可能に作動させることはできない。それは、その部分では、感度が『%ストレス域』に対して極めて敏感に応答するからである。これは、たとえ僅かな『%ストレス域』の変化であっても、割合に大きな感度変化を引き起こすことを意味する。実務的な経済的観点からは、大量生産されたトルク・センサは既知の再現

可能な感度を持っていなければならない。それらを1つ1つ別々に目盛定めしなければならないのは非現実的である。けれども、通常の製造誤差でも小さな『%ストレス域』変化を生じさせる原因となり、その変化は、カーブのAB領域では、センサ間に大きな感度差をもたらす結果となる。従って、商業上有用なトルク・センサは、カーブのもっと平らな部分に沿って作動しなければならない。そこで勾配はゼロに近い。カーブのBC部分における作動は容認可能な妥協策であると思われる。殆んどの材料と残留応力誘起方法のについては、『B』で表される点は周囲領域の周囲長さに沿って少なくとも50%ストレス域、好ましくは80%ストレス域、を上回ることが好ましい。これは、周囲領域の最小許容残留応力負荷は材料及びプロセスの両方に依存し、且つ、一般にはできるだけ100%応力負荷に近いことが最も望ましいという事実の認識に基づいている。

使用可能なトルクを製造するために上記説明を適用し得ることを立証するために、第8図を参照すると、外径0.25インチの円柱状シャフト100に、軸方向長さが等しくて、外径0.215インチの縮径シャフト部分104で隔てられた2つの肩部102が形成されている。このシャフトは、ペンシルベニア州ピッツバーグ市のサイクロプス社 (Universal-Cyclops Specialty Steel Division, Cyclops Corporation of Pittsburgh, Pennsylvania) からUnimar 300kという名称で販売されているニッケル・マレージング鋼で形成され、内部応力を除去するため水素中で813°Cで予備焼なましされている。外径3/4インチ、長さ3/8インチで、その周囲に48個の歯を有する1対の同一のローレット・ローラにより各肩部102に注意深く刻みが形成されている。シャフト軸に対して±30°の角度で各肩部に対称的刻みが形成されるように制御して肩部をローレット・ローラに接触させた。肩部に対する工具の切込みを注意深く制御することにより、各刻みトラフの幅及び深さを制御することができた。各々の刻み付き肩部の周囲領域の周囲長さに沿っての『%ストレス域』は、刻みトラフは肩部上で唯一のストレス域であり、トラフ間の肩部はローレット切り作業で応力を加えられてはいないと仮定し、トラフ幅と弦刻みピッチとを測定してその弦ピッチを周ピッチに変換し、周ピッチに対するトラフ幅の比（この比に100を掛ければ所望の『%ストレス域』の値となる）を計算することによって決定した。このようにして調整したシャフトをレバー・アームに取付けた。このアームは、その各端部のケーブルから10個の1ポンドの錘を吊すことのできるものであった。そのレバー・アームの寸法は、いずれかの側に1ポンドの錘を追加し又は取除けばシャフトに0.5N-Mのトルク変化が与えられるように設定されていた。錘を適当にずらして、シャフトに加わるトルクの大きさと方向との両方を変えることができた。

第9図は、上記の如くにして調整したシャフトの『%

ストレス域』と感度との関係を示すグラフである。このカーブは約60%負荷までは急に上昇し、その後は急に上昇はせずに横ばいになってゆくことが判る。その理由は、低『%ストレス域』値では、周ピッチに対するトラフ幅の比と、シャフトの周囲領域の周囲長さに沿ってのストレス域の実際の割合との間に強い相関関係があると思われるからである。刻みトラフの幅と深さとが増大するに従って、トラフ間の肩部が、少くともトラフの端に近い部分において、僅かに変形し、略々確実に残留応力が生じる。従って、周囲領域において100%応力負荷が達成されるカーブ上の点は、計算された100%値よりやや小さく、このことは、その高『%ストレス域』部分でカーブが急に横ばいになることを説明するものである。このことは、ローレット切り等の多くのプロセスで、100%より小さい局所粉碎で100%応力負荷点に達することができるということを示唆している。これに関して、シャフトに残留応力を誘起する方法は、それぞれ特有の、『%ストレス域』対感度カーブを産出するけれども、各カーブは第7図と第9図に現れた同じ一般的特徴を有すると思われる。

叙上から判るように、トルクが加わっていない時に、等しい軸方向磁化力をバンドに加えると、バンドは対称的に応答し、バンドに付属している感知手段は、応答に差の無いことを検出する。トルクが加えられている時には、その加えられているトルクに伴う主応力は、バンド内の残留応力と、2つのバンド内の合成応力が互いに他と異なるような態様で、結合する。その結果として、透磁率は相異なり、各バンドに付属する感知手段に誘起される起電力はその差を反映する。差の大きさは、加えられたトルクの大きさに比例する。このようにして、本システムは、2つの周囲バンド間の、加えられたトルクに伴う主応力に対する差動的磁気弾性応答を感知する。このことの重要性は、このような感知は結局バンドの周囲全体にわたって平均化された応答を感知するのに等しいことにある。このようにして、表面の不均一性、位置及び回転速度に対する感受性が回避されている。

加えられたトルクに起因する透磁率の変化の感知は、従来技術に開示されているように、多くの方法で行なうことができる。例えば前記のHarada氏外の論文と米国特許第4,506,554号を参照されたい。機能的には、磁気弁別器は、2つのバンド間の、加えられたトルクに対する差動的磁気弾性応答を評価するためのプローブに過ぎない。一般に、それは、時間の経過に従って周期的に変化する磁化力を両方のバンドに加え、その結果としての同バンドの磁化の差を感知することによって機能する。その磁化力は、電流、永久磁石、又はその両方に由来するものである。結果としての磁化は、その発散を通して、磁束又はその時間変化率によって感知することができるものである。トランスデューサ機能は、そのトルクのアナログである電気信号を送出する電気回路によって完成



される。

磁化力を供給すると共に、その結果としての感知コイルの差信号を測定する方法が第2図と第3図に示されている。第2図から判るように、シャフト2と同軸のボビン16,18がバンド6,8を囲んでいる。ボビン16,18に1対のコイル20,22及び24,26が取付けられており、そのうちの22と26は、直列に接続されて交流で駆動される励磁又は磁化コイルであり、20と24は、2つのバンドの磁束の差を感知する反対向きに接続された感知コイルである。略々E形の回転立体としてフェライト材料コア28が随意的に設けられている。シャフトとE形コアとの間の周囲ギャップ30を、シャフトをコア内の中心に保つのに適当である程度に小さく且つ均一に維持することが望ましい。第3図の示すところによると、励磁又は駆動コイル22,26は直列にAC電源32から給電され、反対向きに接続された感知コイル20,24に誘起された起電力は、整流器34で位相敏感に整流されて電圧表示器36に表示される。黒点38はコイルの極性を示す。

シャフト2にトルクが加えられていない時には、バンド内の応力は対称的で且つ等しいので、この条件下では、a.c.駆動入力が増えられても、第3図に示されている回路からの出力信号はゼロである。それはバンドが等しい透磁率を持っているからである。従って、感知コイルに誘起される電圧は、大きさが等しく極性が反対であり、互いに打消し合う。しかし、トルクがシャフト2に加えられている時には、それぞれのバンドは引張り応力及び圧縮応力を受け、その結果として、一方のバンドを通る磁束及び透磁率が増大し、他方のバンドを通る磁束及び透磁率が減少する。斯くして、一方の感知コイルに誘起された電圧は、他方の感知コイルに誘起された電圧を上回り、その誘起された電圧の差を表わす、加えられたトルクに比例する出力信号が得られる。その信号は整流器34で直流電圧に変換され、整流器出力の極性は、加えられたトルクの方すなわち、CW又はCCWに依存する。一般的に、線形で強い出力信号を得るためには、a.c.駆動電流を、励起周波数1ないし400kHz、10ないし400mAの範囲に保つことが望ましい。

第4図は、トルクがシャフトに加えられた時のバンドの透磁率変化を感知する他の種類の磁気弁別器を示す。強磁性コアと、これに巻回されたコイルとから成る磁気ヘッド42,44は、バンド46,48と一致するシャフト40沿いの軸方向位置に設けられて、バンドに磁氣的に結合されている。磁気ヘッド42,44は、ダイオード52,54を通して高周波電源50により駆動される。シャフト40にトルクが加えられていない時には、両バンドの透磁率は等しい。従って、両磁気ヘッドのインダクタンスのレベルは等しくて極性が反対であり、正味の電流出力 $V_{out}$ はゼロである。矢60で示されているように、トルクがシャフト40に加えられている時には、一方のバンドの透磁率は増大し、他方の透磁率は減少する。これに対応して、一方の

磁気ヘッドのインダクタンスは増大し、他方の磁気ヘッドのインダクタンスは減少し、その結果として両ヘッドの励起電流に差が生じる。抵抗器56と平滑化コンデンサ58とを介して流れる励起電流の差は、加えられたトルクの大きさ及び方向を示す極性及び大きさを有する直流電流出力信号を産出する。

本発明の1つの独特な面によると、前述したように、適当な材料のシャフトの2つの接近したバンドの各々に、対称的な、左回り及び右回りの螺旋の方向の磁化容易軸が与えられる。少くともバンドの領域において、普通はその全長にわたって、シャフトは、少くともその表面は、強磁性及び磁歪の性質を有する材料で形成されている。その材料は、磁区が存在を保証するために強磁性でなければならず、加えられたトルクに伴う応力により磁化方向が変化し得るように、磁歪性でなければならない。多くの材料が強磁性であって且つ磁歪性である。しかし、高透磁率、低保磁力、低固有磁気異方性等の他の望ましい磁氣的性質をも示す材料のみが望ましい。また、望ましい材料は、高周波磁場を加えた結果として発生する誘導渦電流を最少限度にとどめるため、高い抵抗率を有する。最も重要なことは、好ましい材料は、同材料を目的の用途に適する高い強度及び硬度を持った適当なシャフトに形成するために必要な冷間加工及び熱処理を受けた後に前記の望ましい磁氣的性質を保持していなければならないということである。

多くの大強度鋼合金が強磁性で且つ磁歪性であるというのは事実である。けれども、その合金の大多数は、希望の用途に適する硬度と強度とを達成するのに必要な熱処理を受けると、その磁氣的性質が様々な度合に劣化するものである。最も著しい劣化は、機械的硬度と磁氣的軟度との間の一般的反比例関係が確実に成立すると思われる。炭素又は炭化物で硬化された合金において記録されている。しかし、AISI 1018等の低炭素合金でさえも、その性能は熱処理で著しく劣化することが判っている。例えばAISI 410などのマルテンサイト型ステンレス鋼と、例えば49Fe-49Co-2V合金等の、他元素を多量に含む鋼についても同じことが言える。本発明の他の独特の面によれば、次のことが確かめられている：すなわち、ニッケル・マレージング鋼は、優れた機械的性質と共に顕著で且つ熱的に安定した磁氣的性質を併せ持っている異常な鋼であり、それ故にこの種の鋼は、強磁性磁歪手段に磁場を加えて、これに加わったトルクに起因する透磁率変化を感知して同トルクの大きさの示度を得る全ての磁気弾性トルク・トランスデューサに用いるのに特に適していて格別に有利である。

ニッケル・マレージング鋼は、一般には、極低炭素、高ニッケル、鉄ベース合金であり、溶接容易で熱処理容易な材料において構造的強さと破壊じん性との非凡な組合せを示す。この鋼は、焼き戻し及び冷却で鉄-ニッケル・マルテンサイト微細構造に変化し、焼戻された状

態又はマルテンサイト状態におけるエージングで非凡な強度特性を得る、緩く結合した鉄ベース合金のグループに属する。そこで、この合金は、その強化に係る2つの主要な反応（マルテンサイト化、エージング）の故に、『マレージング』と呼ばれる。しかし、この鋼は、極めて高いレベルまで急速に強化することのできる著しく粘り強いマルテンサイトの形成を可能にする高ニッケル、極低炭素含有率の故に、独特なものである。エージングされた状態におけるこの種の鋼では、300KSiに及び、且つそれをはるかに上回る耐力を利用することができる。

代表的ニッケル・マレージング鋼は、12~25%Ni、7~13%Co、2.75~5.2%Mo、1.5~2.0%Ti、0.5~0.3%A1、0.03%までのC、残りの鉄、及び微量のMn、Si、S、P、C b等の他の元素から成る合金である。最もありふれていて実用上重要なマレージング鋼は、少くとも現在、エージングにより約200KSi、250KSi、及び300KSiの耐力を生ずることのできる18%Ni鋼である。18Ni200、18Ni250、及び18Ni300級マレージング鋼と呼ばれるその特別の合金は、1~19%Ni、7~9.5%Co、3.0~5.2%Mo、0.1~0.8%Ti、0.05~0.15A1、0.03%までのC、残りの鉄、及び微量の他の元素、の範囲の代表的組成を有する。普通、18%ニッケル・マレージング鋼は、析出物を溶解し、内部応力を除去し、完全なオーステナイトへの変化を保証するため、例えば厚み1インチあたり1時間の充分な時間1500°F以上の温度で焼き戻しされて熱処理される。空気冷却後、18%Ni鋼は、普通は、750~1100°F（望ましくは900~950°F）で、厚みに応じて3~10時間（普通3~6時間）エージングされる。けれども、僅か10分間エージングしただけで満足な強度特性と優れた磁気特性とを合金に与えることができるということが判っている。

他の周知のニッケル・マレージング鋼は、コバルトを含まない18%ニッケル・マレージング鋼と、コバルトを含む25%Ni、20Ni、及び12%Niマレージング鋼である。18%Ni-Co含有マレージング鋼は、幾つかの供給元から販売されている。すなわち、それらの鋼は、VascoMax C-200, VascoMax C-250, VascoMax C-300, 及びVascoMax C-350という商標でテレダイン・バスコ社（Teledyne Vasco of Latrobe, Pennsylvania）から；Marvac 250及びMarvac 300という商標でラトロブ・スチール社（Latrobe Steel Company of Latrobe, Pennsylvania）から；Unimar 300Kという商標でサイクロプス社（Universal Cyclops Specialty Steel Division, Cyclops Corporation of Pittsburgh, Pennsylvania）から；Almar 18-300という商標でスペリオールチューブ社（Superior Tube of Norristown, Pennsylvania）から；入手可能である。18%Ni-コバルト無しマレージング鋼は、VascoMax T-200, VascoMax T-250, 及びVascoMax T-300という商標でテレダイン・バスコ社（Teledyne Vasco of Latrobe, Pennsylvania）から販売されている。鉄-ニッケル・マルテン

サイト相を形成する他の高ニッケル鋼は、もっと一般的なマレージング鋼のそれに類似する、温度変化に対して相当安定した機械的及び磁気的性質を示す。その中で最も有名なのは、9.84Ni, 3.62Co, 0.15 C、残りは鉄という代表的重量%組成を有する、テレダイン・バスコ社（Teledyne Vasco）から販売されている。公称9%Ni-4%Co合金である。また、例えば15%Ni-15%Coなどの、他の色々な高ニッケル・コバルト組成のマレージング鋼が、色々な性質のうちの1つ又は幾つかの組合せを最適化するために、断続的に試験されている。従って、本書においては、『Niマレージング鋼』は、9ないし25%のニッケルを含有していて、前述の如くに鉄-ニッケル・マルテンサイトの形成からその強度特性を得る鉄及びニッケルの合金を意味する。

その顕著な物性及び強度特性に加えて、ニッケル・マレージング鋼は優れた磁気的特性を持っているので、非接触トルク・トランスデューサの磁性材料として用いるのに特に適している。すなわち、この合金は、25ppm±15ppmの範囲の略々等方性の強い磁歪性を有するがピラリ反転を示さず；電気抵抗率が高く；結晶構造による固有磁気異方性が弱く；透磁率が高く；保磁力が低くて、5~25エルステッドの範囲にあり；合金の化学的性質で磁気的性質が安定している。しかし、最も重要なことは、その磁気的性質が強化処理によって控えめに、けれども好都合に、影響されるに過ぎないということである（実際、その磁気的性質は冷間加工とエージング熱処理で向上する）。この点で、ニッケル・マレージング鋼は他の全ての大強度合金と相違している。従来は、一般的知識として、鋼の機械的及び強度的性質を改善するのに必要な熱処理は、その磁気的性質には有害であるとされてきた。例えば、焼入れされた鋼合金は一般に非常に低い透磁率と高い保磁力とを示すが、これは不都合な磁気的性質の組合せであり、そのために当該合金の弱磁場に対する感度は著しく低下し、本書で考察しているようなトルク・トランスデューサには不向きとなる。ところが、ニッケル・マレージング鋼については、これはあてはまらない。本発明により、極めて大きな強度を与えるために、行なう冷間加工及びエージング熱処理でニッケル・マレージング鋼は磁気的に軟化するということが確認されている。実際、例えば18%Niマレージング鋼の保磁力は、900°Fで10時間エージングされると、低下する。その結果、マレージング鋼を、エージング済みの状態（すなわち、その鋼が最大強度特性と、略々同等又は向上した磁気的特性とを示す状態）で有利に使用することができる。

従って、磁気弾性トルク・センサの磁性材料として、特に、そのトルクが感知されるべき装置のシャフト材料としてマレージング鋼を使用すれば、その種の装置のシャフトを磁性部材として使用することに対して従来なされていた異議を実際上全て除去することができる。マレ

エージング鋼の機械的及び強度的性質は、殆んど全てのシャフト用途における機械的性質に関する要求を満たすと同時に、トルク・センサにおけるその役割のために顕著な磁氣的性質を提供する。マレージング鋼をエージングすると、透磁率の低下や保磁力の増大を伴わずに、機械的用途に必要な大強度及び高硬度を与えることができる。その上、1500°Fより高い温度での初期溶体化処理を含む、マレージング鋼を熱処理する伝統的方法是、機械加工による内部応力と、不均一性及び結晶方向による殆んど応力とを除去して、マレージング鋼シャフトの無秩序な磁気異方性の量を最少にする。例えば、シャフトの通常使用時に予想される最大トルク応力より大きな応力で、その弾性限界を越えてシャフトに応力を加えることによって比較的強い磁気応力異方性を意図的に浸透させた1対の隣り合うバンドを、本発明に従って前記の熱処理と組み合わせれば、シャフトの無秩序な異方性の、全磁気異方性への寄与は実際に無視することができる。

磁気弾性トルク・トランスデューサにおけるニッケル・マレージング鋼の利点は、シャフトを所望のニッケル・マレージング鋼で形成することにより；シャフトの或る領域を所望のニッケル・マレージング鋼で形成し、この領域に環状バンドを置くことにより；又は目的とするシャフトの機能に適する機械的性質を有する合金で形成したシャフトの表面をニッケル・マレージング鋼で仕上げること、すなわち、シャフトの適当な軸方向範囲の少くとも1つの完全な周囲領域に所望のニッケル・マレージング鋼の表面仕上げ合金を付着させ、この領域に環状バンドを配置すること、によって；それぞれ実現することができるということが理解されるであろう。本発明による透磁率感知は、基本的に表面現象であるから、その表面処理は、約0.015インチを越えない厚みの周囲層を付けることを要する。その表面処理方法は、例えば、電気メッキ、金属吹付け、スパッタリング、真空蒸着、イオン・インプランテーション等の、多くの既知の付加プロセスの中から選ぶのが有利である。

本発明のトルク・トランスデューサにおける磁性材料としてのマレージング鋼の顕著な質を実物で示すと共に、マレージング鋼の性能を他の大強度鋼と比較するために、螺旋対称左回り及び右回り磁化容易軸を有する1対の磁方向に離間したバンドがその上に形成されている直径12.7mmの円柱状シャフトを用いてトルク・トランスデューサを組立てた。各々のバンドは12.7mmの軸方向長さを有し、12.7mmのシャフト区域で隔てられていた。それらは、その周囲に48個の歯を有する外径3/4インチのローレットによるローレット切りで形成されたのであるが、その歯は各々シャフト軸に対して30°の角度を成す方向を向いていた。この配置の特徴は、シャフトと同軸で、軸方向においてバンドと整列するようにボビンを配置することによって感知されたが、各ボビンには磁性コイル及び感知コイルが取付けられていた。磁化コイル

は、10kHzの周波数で200mAピーク駆動電流を出力する交流電流源に直列に持続されて駆動された。感知コイルの各々に誘起された起電力は別々に整流され、その整流された出力は逆向きに接続されて差信号を産出し、この信号は電圧表示器で表示された。4本のシャフトを使用した。それらは、各々相異なる材料で形成されていたことを除いて、他の全ての面で同じであった。各シャフトの組成を重量%で以下に掲げる。

T-250 : 18.5 Ni; 3.0 Mo; 1.4 Ti; 0.10 Al; 0.03より少ないC; コバルト無し; 残りはFe

SAE 9310 : 0.08~0.13 C; 0.45~0.65 Mn; 3~3.5 Ni; 1~1.4 Cr; 0.08~0.15 Mo; 残りはFe

416 SS : 11.5~13.5 Cr; 最大0.5 Ni; 最大0.15 C; 最大1.0 Mn; 最大1.0 Si; 残りはFe

AISI 1018 : 0.15~0.20 C; 0.6~0.9 Mn; 最大0.04 P; 最大0.05 S; 残りはFe

第1連の運転では、テレダイン・バスコ社から受取った時の、溶体化処理はされているがエージングはされていない状態のままT-250ニッケル・マレージング鋼シャフトを使用した。同様に、他のシャフトも、購入時の状態のまま、それ以上の熱処理をせずに使用した。試験の対象としての各シャフトに既知のトルク荷重を加え、出力電圧信号を記録した。加えるトルクを0から100ニュートンメートル(N-M)まで増大させた。第5図は、各シャフトについての、加えたトルク対出力d.c.電圧のグラフである。明らかに、与えられたトルク荷重に対する出力信号の大きさに関して、T-250シャフトの感度は、試験された他のシャフト材料より著しく大きかった。その上に、T-250シャフトについての出力信号の直線性は、全トルク範囲にわたって極めて良好であった。他のシャフト材料は、T-250シャフトに比べると、加えられたトルクに対して略々同程度に鈍感であると思われた。いずれもT-250シャフトほど直線性の良好な信号を出さなかったけれども、各々、かなり直線的な信号をトルク範囲の大部分にわたって産出した。

第2連の運転では、T-250のニッケル・マレージング鋼シャフトを約900°Fで30分間エージングして同シャフトの強度と硬度を向上させた。試験の一貫性を保つために他のシャフトも同様の方法で熱処理をし、その後、各シャフトに0~100N-Mのトルクを加えて出力d.c.電圧を記録した。第6図は、熱処理の各シャフトについての、加えられたトルク対出力d.c.電圧のグラフである。この場合にもT-250シャフトの感度は他のシャフトの感度はるかに上回り、また、T-250出力信号は全トルク範囲にわたって直線的であったということが判る。エージングをされていない状態のT-250シャフトについての第5図と比較すれば判るように、エージングはシャフトの感度を多少向上させており、これは、エージングでマレージング鋼の磁氣的性質が或る程度向上したことを示す。対照的に、SAE 9310シャフトの感度は、この熱

処理で向上したようには見えない。その上に、出力信号の直線性は、特に加えられたトルクが大きいとき、明らかに悪くなっていた。AISI 1018シャフトの感度は低トルク域で著しい向上したが、約40N-Mから衰え始め、その後は悪化していた。エージングされたAISI 1018シャフトについての出力信号の直線性は悪かった。

416 SSシャフトについては、低トルク域での感度は熱処理で向上したが、大トルク域では相当悪くなっていた。416 SS出力信号の直線性は熱処理で悪くなった。加えられたトルクに対する出力信号の応答は雑多であるけれども、熱処理はSAE 9310, 416 SS, 及びAISI 1018シャフトの機械的及び強度的性質に悪い影響を与えたということは注目に値する。例えば、熱処理後に加えた僅かに約50N-Mのトルクは、AISI 1018シャフトの弾性限界を越え、シャフトは永久的振り変形を起こした。

更に、第6図に示した結果は、T-250合金との比較を行なうのには意味があるが、磁気弾性トルク・トランスデューサのシャフトにこれらの合金を実際に使用して利益があるか否かを判定するためには当てにならない。その理由は、これらの合金に対して行なった熱処理が900°Fでの30分間のエージングであり、これはT-250合金に適用したのと同じ熱処理であったことにある。けれども、この熱処理は、これらの鋼合金の機械的及び強度的性質を改善するのに有効な熱処理ではなかった。一般に、例えば、416 SSの焼入れには、950°C以上に加熱することが必要であり、SAE 9310の肌焼きには、900°C以上に加熱することが必要である。このような高温では、ローレット切りのプロセスでバンド内に発生した残留応力と、その残留応力により生成された磁気異方性との大部分が除去され、機械的には硬いけれども磁気的には劣る合金が得られ、その合金は、本発明の磁気弾性トルク・トランスデューサの磁歪性・強磁性シャフト素子としては本質的に役に立たない。また、SAE 9310の肌焼きなどの或る種の熱硬化処理はシャフトを反らせる結果となり、更に処理をしなければ、目的とするトランスデューサのみならず他の如何なるトランスデューサにも使用できないシャフトとなってしまうことが記録された。残念なことに、反ったシャフトを真直にするのに必要な切削などの処理をすると、バンドに意図的に浸透させた磁気異方性が変化し、シャフトに注意深く施された磁氣的予備調整が實際上だいなしになる。

第5ないし6図は、比較的低い10kHzの交流励起周波数を用いた場合の印加トルクに対する信号をグラフで示している。出力信号は交流周波数に正比例し、ほぼ線形に増加することが認められる。また試験の結果は、例えば20kHzで、出力直流電圧信号の倍加が得られることを示している。使用する回路に応じ、1~100kHzの交流周波数が本発明のトルクトランスデューサを駆動するのに支障なく使える。好ましくは、ホイッスラ雑音を避けるため、可聴レンジよりすぐ上の10~30kHzの周波数を用

いる。最も望ましくは、周波数を約20kHzに調整する。周波数に対する応答と同様、出力直流信号は、周波数に応じて10~400mA（ピーク）の範囲とし得る駆動電流にほぼ正比例、より厳密にはS字状に変化すると見られる。一般に、選定周波数で良好な信号を得るのに、望ましくは印加トルクの全範囲にわたって信号ヒステリシスをゼロに調整するのに十分な電流が使われる。

ニッケルマレージング鋼製シャフトの感度が、非磁性シャフトに非晶質リボンを接着固定したものをを用いた研究者等によって報告されている感度より著しく優れている点に注意すると興味深い。第6図から、本発明によれば、12.7mmのシャフト直径を有する時効後T-250ニッケルマレージング鋼製シャフトが、10kHzの交流周波数と200mAの励起電流、および各々100回巻の励起コイルと各々500回巻の検知コイルを用いると、60N-Mの印加トルクで0.9ボルトの出力直流信号、すなわち0.015V/N-Mの感度を生じることが明らかであろう。比較として、ササダ等は第11回IEEE産業エレクトロニクスソサイアティ年次会議（1985年11月18-22日）の報告で、非晶質リボン型トルクセンサについて、20kHzの交流周波数、200mAの励起電流、各々220回巻の励磁コイルと各々80回巻の検知コイル、および12mmのシャフト直径を用いた場合、10N-Mの印加トルクで35mVの出力直流信号を示している。感度は交流周波数、励起電流、励起及び検知コイルの巻数に比例し、シャフト直径の立方に反比例するので、第6図に示したものと同じベースに補正したササダ等の感度は0/007V/N-Mである。すなわち、本発明のトルクトランスデューサは、ササダ等の非晶質リボン型トルクセンサより2倍以上感度がよい。

ニッケルマレージング鋼の絶対的および相対的利点に関する上記の議論から、もっと普通の鋼合金は本発明で使えないと思われるかもしれないが、これは明らかに事実と反する。勿論、ニッケルマレージング鋼を除く全てのものは、完全な硬化を達成するのに高温での硬化の後急冷したり、あるいは肌焼きを達成するのに浸炭気雰囲気内で高温加熱するなどの加熱が、意図しない残留応力を帯状組織（バンド）内に熱的に生じる結果、本発明の磁気弾性トルクトランスデューサにとって不可欠な帯状組織内の応力に基づく大きな残留磁気異方性が失われてしまうという非常に重要な欠点を免れないのは真実である。しかし、第5図に示したデータから、試験したSAE 9310, 416 SSおよびAISI 1018合金の各々が、所定のトルク付加に対する出力信号の大きさの点で有用な範囲内の感度をもたらすこと、更にトルクレンジの大部分にわたって十分に線形の信号を発生することが明らかである。つまり、これらの合金を第5図に示したデータで例示したような種類のトランスデューサの用途に不向きとしているのは、それらの固有な磁気特性でなく、むしろ意図する機械的機能を実行するのに必要とする機械的および強度的特性を合金に与えるのに必要な熱硬化工程が、それ

ら合金の好ましい磁気特性を破壊するためと考えられる。これに関連して、本発明のトルクトランスデューサのほとんどの用途では、設置される機器の動作特性によって要求される回転シャフトの機械的および強度的特性の必要条件が、鋼合金をそれらの硬化状態で用いることを必要としている点が理解されよう。

本発明による有効な磁気弾性トルクトランスデューサは、強磁性および磁気弾性シャフト部品としてニッケルマレージング鋼を用い、さらにニッケルマレージング鋼合金を時効化してその機械的及び強度的特性を改善する前また後に、帯状組織内に残留応力を発生してシャフト中に所望な磁気異方性を導入することによって作製できることは既に指摘した。また、本発明による有効な磁気弾性トルクトランスデューサは、選択した非Ni-マレージング鋼合金を用い、さらにNi-マレージング鋼合金を適切に熱処理してそれらの機械的及び強度的特性を改善した後でのみ、帯状組織内に残留応力を発生させることによって作製できることも指摘した。多くの理由から、全ての非Ni-マレージング鋼合金をそのように用いることができないことは明らかであろう。一般に、各種の炭素含有量を持つ焼きなまし鉄-炭素合金において、磁歪、つまり印加磁場内の長さのわずかな変化は負である。多く例で、合金はビラーリ (Villari) の反転現象を生じる—まず磁場強度の増加につれて膨張し、すなわち長さのわずかな変化は正であり、その後さらに磁場強度の増加につれて収縮する、すなわち長さのわずかな変化は負になる。このような反転現象を起こす合金で形成されたシャフトにトルクを加えると、応力の加わった異方性が存在するランダムな異方性に対して、正磁歪のシャフト領域と負磁歪のシャフト領域とで異なった作用を及ぼす。これは、異方性の局所的な磁歪のため、シャフト内の異なる位置で変化する複合異方性をもたらす結果、一様な磁化が得られなくなる。自明なごとく、これはトルクトランスデューサにおいて許容できない状態で、ビラーリの反転現象を起こす合金は明らかに使用できない。一定の元素、例えばニッケルと合金すると、得られる合金がより正になることは少し以前から知られていた。事実、鉄-炭素合金系でのビラーリの反転収縮を取り除くのに、わずか1~3重量%のニッケルで充分なことが指摘されている。つまり、元の鉄-炭素合金内のニッケル量が増せば、その合金は全ての磁場強度でその磁歪が正となるように挙動し、シャフト内の異なる位置での複合異方性がより一様となり、従って一様な磁化が得られる。その他の合金形成元素、例えばクロム (Cr)、コバルト (Co)、チタン (Ti)、アルミ (Al)、マンガン (Mn)、モリブデン (Mo)、銅 (Cu)、ホウ素 (B)、およびこれらの組合せの追加は、鉄-炭素合金系の磁歪をより正の方向に向かわせるという同様の傾向も指摘されている。鉄-炭素合金系でのビラーリの反転現象に対処する別の手段は、約750-800℃の高温

で焼きなましして急冷し、それ以上焼きなまし強化しないことである。このような処理は、ビラーリの反転現象を実質上取り除き、実質上正方性の磁歪を有する硬化された鉄-炭素合金系を生じると考えられる。さらに、熱処理による硬化は、それまでの処理による冷間加工での応力とそれに伴うランダムな異方性を取り除き、捻り応力の透磁性に対する影響に関連してヒステリシスと線形性を改善する。

従って本発明によれば、回転シャフトのまたはそれに関連した強磁性の磁歪領域として有用な非Ni-マレージング鋼合金は、少なくとも5ppmの絶対値を持つ実質上正方性で、高い磁歪を有し、熱処理によって硬化されており、炭素含有量が0.05-0.75重量%の範囲で、シャフトの目的用途の機械的、化学的および磁氣的な (異方性と磁歪をもたらす) 必要条件に合った合金組成を有すべきである。

上記の点は全て、本発明で有用な非Ni-マレージング鋼合金を少なくとも5ppmの絶対値を持つ実質上正方性の磁歪と、以下に指示する次の元素からなる組成を有する熱的に硬化した鋼合金の中から選択することによって達成できる：

FeCaMbQc

但し、“M”はNi, Cr, Co, Ti, Al, Mn, Mo, Cu, 及びBからなる群の中から選ばれた1つ以上の合金元素、

“Q”は、シリコン (Si)、リン (P)、イオウ (S)、窒素 (N)、セレン (Se)、タングステン (W)、バナジウム (V)、ハフニウム (Hf)、コロンビウム (Cb)、タンタル (Ta) および錫 (Sn) など普通の鋼合金元素を含むが、これに限られないその他の1つ以上の合金元素；

“a”は0.05-0.75重量%の炭素含有量を示す；

“b”は合金の磁歪を少なくとも5ppmの絶対値レベルへ高めるのに少なくとも充分な1つ以上の合金元素 “M” の含有量を示し、磁歪の所望レベルは所定の用途に合わせて加えられるトルクに基づく静止異方性 “K” と印加応力に依存する；

“c”はゼロから、合金の所望な機械的、化学的、および/またはその他の特性に応じた任意の有用量までの1つ以上の合金元素 “Q” の含有量を示す。

適切な非Ni-マレージング鋼合金の上記定義を前述したいくつかの例示鋼合金に適用し、また各種合金元素に関する公表磁歪データを適用すれば、合金の磁歪を少なくとも推定することができる。例えばAISI 410の場合には、12.3%Crの存在が合金の磁歪を約20ppmまで高める主要因で、AISI 502の場合には、5%Crと0.8%Mnの存在が合金の磁歪を約7ppmまで高める主要因で、SAE 9310の場合には、3-3.5%Niと1-1.4%Crの存在が合金の磁歪を約15ppmまで高める主要因である。

(産業上の利用可能性)

50 本発明の特有で且つ改良された磁気弾性トルクトラン

スデューサは、あらゆる種類およびサイズの部材中のトルクを、その部材が動作する装置あるいは用途にかかわらず、検知および測定するのに広く使える。トルクが回転部材を有する系の制御において絶対的な基本パラメータであることは、一般に受け入れられている。回転部材に生じている瞬間的なトルクを検知し、それに応じてトルクとの間に既知の関係を有する電流を発生することは、回転部材を駆動しているエンジン、マシン、モータ等のマイクロプロセッサその他を介して制御あるいは故障発端問題の早期診断を可能とする。

本発明のトルクトランスデューサの用途は、回転部材を有する実質上あらゆる装置に見いだせる。高感度で、応答性が良く、しかも安価な磁気トルクセンサが、エンジンおよび動力駆動装置のトルクをモニターして、全体的な性能と燃費を向上し、排気物を抑制し、さらに伝達比を調整するため；船舶の推進系では、推進機械の出力減少、船体付着物の影響およびブラベラの損傷を検出して補正するため；ヘリコプターのタービンでは、過負荷を避け、また例えば砂や塩の吹き付けによって生じる動力損を検出するために要求されている。また、本発明に基づき、繊維の品質を維持するためのパルプ粉砕機、製紙機などあらゆる種類の重工業用機械を制御するのに設けたり、更には食品ミキサーや処理装置など家庭及び商業用機器で用いるようなトルクトランスデューサも要求されている。さらに、小型で、安価で、感度が良く、高信頼のトルクトランスデューサに対する要求も、機械工具、手工具、ロボット、情報装置、産業用測定計器、各種の重量計量システム、補助電気動力を用いたパワーステアリング装置、及び車両牽引釣合装置などさまざまな用途で認められている。

本発明の磁気弾性トルクトランスデューサの用途のうち、エネルギー節約、環境のクリーン化と安全性に対するトルクトランスデューサの潜在的な貢献度、さらに多くの人々とビジネスに直接影響を及ぼす点から特に見込みのある1つは、内燃機関と付設のエンジン動力駆動装置における用途である。本発明のトルクセンサは、エンジンのアイドルと最大動作速度間のあらゆる時点での事象に寄与する重要なトルクの顕著な項目を識別するために、十分に広いバンド巾にわたってエンジンのトルク特性をカバーできる。正確でコスト効率の良い方法でのトルク検知は、エンジンの機能状態による故障発端問題の早期診断を可能とし、重要な時点で車両の動作機能を制限するかもしれない予期しない故障の回避を助け、さらにエンジンおよびその動力駆動装置の性能と経済性を向上および／または制御する。

最近の車両の推進、その他重要な機能のための主動力は、内燃機関の回転出力シャフトから得られている。エンジンの種類にかかわらず、実際にそのシャフトから車両に伝えられる動力は、2つのパラメータ、回転速度と伝達トルクだけの数値積である。これら2つのうち、

回転速度はそれ自体エンジンの内部発生トルクに依拠しているもので、トルクの方が集約的なパラメータである。車両の加速度、坂での速度、その他の走行および性能因子に関する制限を左右するのは、利用可能なトルクの大きさである。車両の満足できる使用と快適さは最終的に、エンジンがその動作速度範囲にわたって機能的に必要なトルクをできるかどうかの能力に依存している。

タービンエンジンが定負荷を駆動している場合を除き、エンジンの出力シャフトを介して伝達されるトルクは急速に変動する。かかる変動は、エンジンによって発生されるトルクの周期的な変化と、車両の負荷によって課せられるトルクの一時的な変化の両方を反映している。ピストン型エンジンの場合、トルクはシリンダーによってそれが出力工程にある間だけ発生される。多気筒エンジンは、各シリンダからの出力工程の位相を重複させることでかなりならされた発生トルクを得ている。これで出力トルクの周期的な変化が減少され、さらにエンジンの内部移動部品の複合慣性によっても減少されるが、それでも各シリンダの発生トルクが持つ強い瞬間衝撃的な性状は出力シャフトを介して伝わる。こうして瞬間的に加えられた捻り振動が、往復移動する連結部品の加速度の変化と組み合わせられて、時間変化する追加のトルク成分をもたらす。このトルクの大きさだけでなくその方向も、スロットル弁の設定、ギヤ位置、負荷ピックアップ、道路表面の傾斜及び路面の粗さなど、車両の作動条件の変化によって更に左右される。

エンジンの出力シャフトに加わるトルクは、こうした複数の発生源からの寄与の累積を表しているが、その多くは相互に強く依存しており、それらの組合せがエンジンの性能を特徴付ける実効特性を形成する。かかる特性の顕著な特徴は、例えばシリンダの点火など特有のエンジン事象と明らかに関連している。平常特徴の欠如、その変化または新たな特徴の発生は、機能の異常を反映することとなる。異常の性状と範囲が、特定のエンジンまたは駆動ラインでの故障の徴候を表す。多くのエンジントラブルは、全体の性能および／またはもっと対象を絞って測定可能な量（例えばマニホールド圧、圧縮度、ノズル特性、排気ガスの分析値）に関する徴候的な影響によっても検出できるが、これらは何れも、適正なエンジンの機能を総合的に特徴付けている個々の事象として、トルクほどに感度良く定量化できない。トルクはエンジンが実際に直接生み出しているものなので、間接的に関連しているパラメータを測定しても、トルク自体の測定で得られるほど、不適切な事態の発生を正確に見極めることはできない。動力計を使ったり、あるいは点火断続および／または燃料流量の段階的変化を含む手順による無負荷エンジンでの加速度および減速度の測定に基づいた従来のトルクデータ取得方法は、平均値を求めるだけで、明確な診断および制御に必要な詳細データが欠けている。エンジン出力シャフトのトルク特性に含まれる情

報の取得と分析は、故障発端問題の診断を可能とし、重要な時点で車両の動作機能を制限するかもしれない予期しない故障の回避を助け、さらにエンジンおよびその動力駆動装置の性能と経済性を向上および／または制御する。ここで重要なのは、意味のある分析を行うのに十分なトルク情報を取得することである。

4000rpmで作動する12気筒、4工程のエンジンでは、毎秒400回の出力工程と（少なくとも）1600回のパルプ事象（開閉）が生じる。タービンエンジンはもっと滑らかな動力入力で作動するが、毎秒500回転までの速度に達する。こうした顕著な事象の中から重要な項目を弁別できるためには、トルク検知系が最大事象速度の少なくとも数倍、すなわち5kHz近くまで十分にフラットな周波数応答を持っていなければならない。また周波数応答は、車両負荷によって加わる安定状態でのトルク成分を忠実に捕らえるため、低周波数側もゼロHzまで延びていなければならない。

診断手段として最大限生かすためには、全バンド巾とすることが明らかに望ましいが、10Hzまでの低周波数スペクトルで得られる情報が、制御量（入力）と負荷（出力）の変化に対するエンジンの全体的応答を正確に記述する。この情報から性能の変化を目的通り評価できるだけでなく、別の領域、エンジンの制御及び付設の動力駆動装置においても潜在的に重要な使用価値を持つ。

5kHzのバンド巾能力を有するトルクセンサは、任意に位置決めできない。トルクは別々の位置での接触力によってエンジンシャフトに印加されるが、連続的な応力分布によって軸方向に伝えられる。一時的なトルク事象は瞬間的に伝えられないだけでなく、シャフトに沿って不変の状態にも留まらない。実際のトルク材料の有限の弾性と慣性が組み合わされて、トルク変化の伝達可能な速度を制限する。急激な一時的変化は、材料とモードに依存したシャフトに沿う特性速度で移動する弾性および運動エネルギー（応力は）の振動交換をトリガーする。伝達されるトルクの忠実度は、その発生源からの距離に応じ、内部及び外部摩擦の累積消散効果によって更に減少される。このためセンサは、減衰により、あるいは干渉及び反射応力波の複合組合せからなる背景“ノイズ”のため所望なトルク情報が失われるのを避けるのに充分なだけ、発生源に近付けて位置させなければならない。

センサの重要な必要条件は、少なくともシャフトの軸

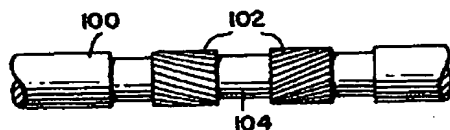
と平行な寸法が小さく、頑丈で、更に摩損、腐食または疲労など使用や時間に伴う劣化影響を受けないことである。またセンサは、特にエンジンシャフトを含むトルク検知系の各部品修理あるいは交換時に、性能の検証及び較正をし易くしなければならない。さらにセンサは、エンジンと駆動ラインの製造可能性、動作及び保守に無視し得ない影響を及ぼすべきでなく、またどんな状況下にあっても、トルクセンサの故障が車両の正常な動作に干渉する付随の結果をもたらすべきでない。

以上から、エンジン、動力駆動装置、あるいはその他の装置いずれにせよ、適切なトルクセンサは、誤用し難く、トルク印加シャフトについて得られる多くのトルク情報を信頼できる方法で取得できる邪魔にならない装置であるべきことが明らかであろう。従来考えられている従来水準に属するトルクトランスデューサの何れも、これらの情報を満たすことができない。しかし、本発明の磁気弾性トルクセンサはあらゆる点で極めて適していると認められ、商業的に実施し得る安価で、信頼でき、且つ高感度なトルクセンサを初めて可能とした。

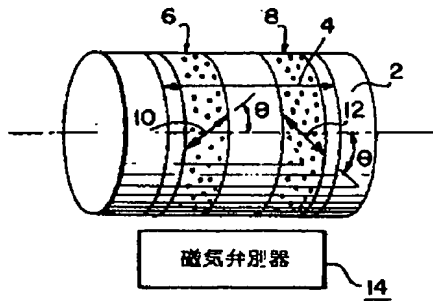
#### 【図面の簡単な説明】

第1図は本発明による磁気弾性トルクトランスデューサの斜視図；第2図は本発明による磁気弾性トルクトランスデューサの断面図で、該磁気弾性トルクトランスデューサで有用な磁気弁別器の一形態を示す；第3図は第2図の磁気弁別器に付設の回路を示す回路図；第4図は本発明による磁気弾性トルクトランスデューサの概略図で、該磁気弾性トルクトランスデューサで有用な磁気弁別器と付設回路の別の形態を示す；第5図は本発明の数種類の磁気弾性トルクトランスデューサに関する印加トルク対出力信号の関係を示すグラフ；第6図は各シャフトを同一の条件下で熱処理した後における、第5図の磁気弾性トルクトランスデューサに関する印加トルク対出力信号の関係を示すグラフ；第7図は本発明のトルクトランスデューサの帯状組織における周囲領域の円周長さに沿った、トルクトランスデューサの感度対残留応力負荷の関係を示すグラフ；第8図はトルクトランスデューサの感度試験で用いた試験片の正面図；第9図は本発明のトルクトランスデューサに関する感度対残留応力負荷の関係を示す第7図と同様なグラフで、制御下のローレット切り法による残留応力に基づいた磁気異方性がトルクトランスデューサの帯状組織に与えられている。

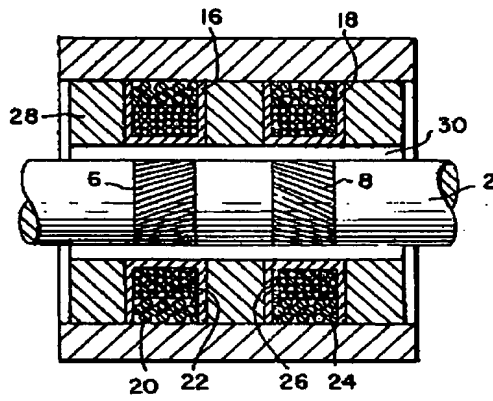
【第8図】



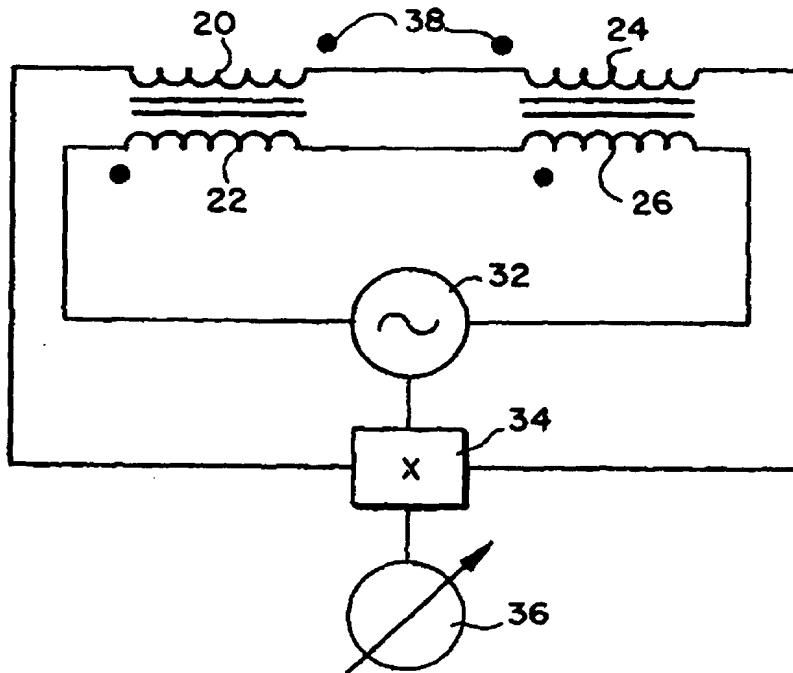
【第1図】



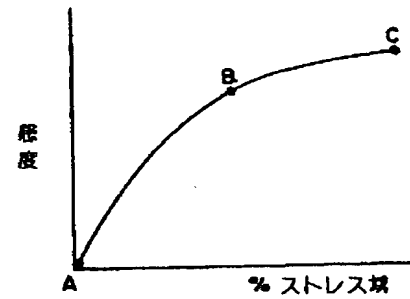
【第2図】



【第3図】

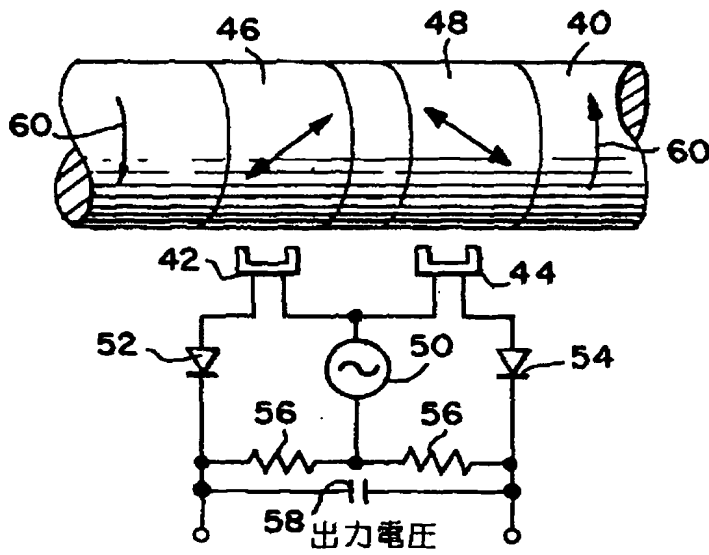


【第7図】

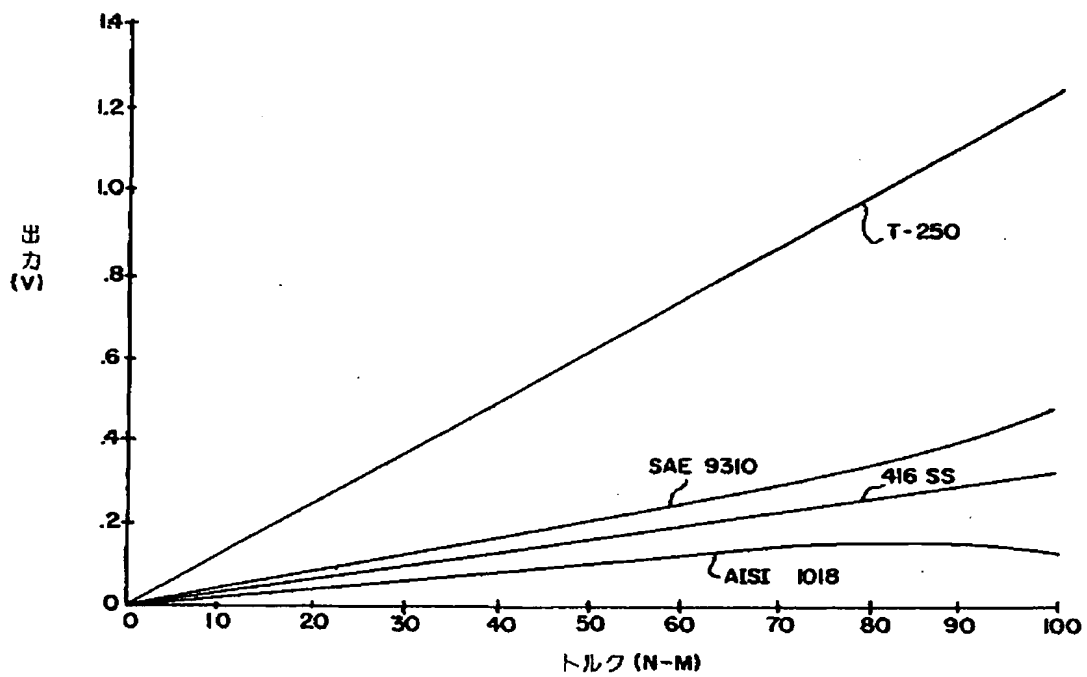




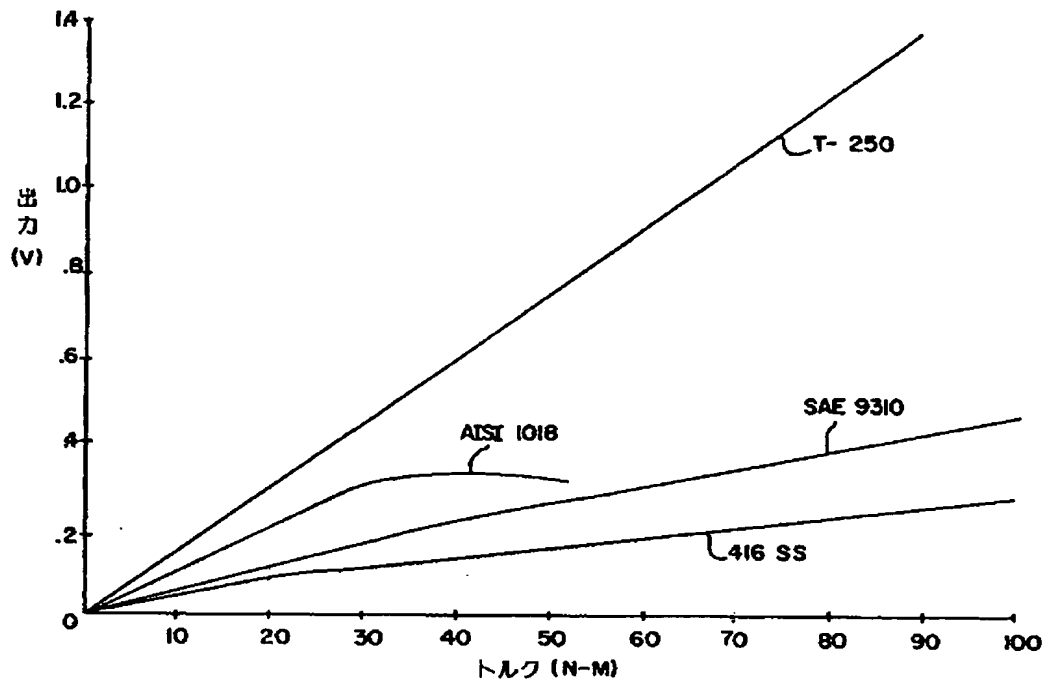
【第4図】



【第5図】



【第6図】



【第9図】

